技術解說

TRANSVEKTOR制御를 한 誘導電動機의 Field Orientation 運轉方式

黃 煥 文*

차 례

1. 서 론
2. Field Orientation의 원리
2-1 전류제어 Field Orientation
2-2 전압제어 Field Orientation
3. Field Orientation의 실제
3-1 Actual-value computer
3-2 Control
3-3 Manipulated-variable vector
3-4 운전결과
4. 결 론
參考文獻

1. 서 론

可變速運轉技術에 있어서, 3상농형유도 전동기의 응용범위는, 회전자계전동기에 磁界Orientation 制御方式의 도입으로 본격적인 확대를 갖어왔다.

일반적으로, 유도전동기는 속도조정이 어려운 기계로 취급되어 왔다. 다만, 제작면에서 값이 싸다는 것과, 운전보수면에서 다른 전동기에 비하여 유리하다는 점으로 많이 이용되어 왔다. 그러나 속도 조정능력은 전혀 없어서 속도제어를 필요로하는 전동력은 거이 직류기가 담당하여 왔다. 근원적으로 살펴볼때,속도조정능력은 전동기구에 Switching機能을 갖고 있는 것 만이 가능하다. 직류기 및 정류자전동기가 이에 속하는 것으로, 이들은 모두 브랏쉬와 정류자를 갖고 있으며,이것이 Switching機能을 하고 있다. 그러나 이들은 보수면에서 취약점을 갖고 있으며, 제어 및 운전의 실뢰성, 수명 및 경제성에 문제점이 제기되어왔다. 그리하여 속도조정기능에서는 필수요건으로 되어있는 Switching機能을 정류자와 브랏쉬외의 것으로 대신하는 형식의 것을 실용화하고져, 그 개발연구가 계속되어 왔다. 무접점소자로서 Switching 機能을 갖춘 thgristor소자의 개발은, 이런관점에서 획기적인것으로. 이들의 응용은 전동기구의 제어형식을 근본적으로 바꾸어 놓았다. 더욱히 펄스파형의 전력을 자유자재로 변환시킬 수 있는 변환기의 개발이 이루어지고 부터는, 고유주파수에 근거를 둔 Vector 변환계념을 변조주파수에 근거를 둔 Manipulated variable vector 변환으로 에너지를 변환시킬 수 있다고 생각하게 되었으며, 여기엔 Switching機能을 내포하고 있다고 볼때, 이의 응용은 속도제어의 새로운 기구의 개발가능성을 한층 높였다고 본다.

유도전동기의 속도조정기구의 개발은, 먼저, thyristor주파수 변환기에 의하여 1차전압과 1차 주파수를 비례적으로 제어하는 V/F制御方式의 채택이다. 이는 주파수변환에 의하여 가변속도화하였으며, 이때 1차전류는 그 절대치만이 제어되어, 유도전동기내부에서 그때의 slip주파수에 대응하는 磁束成分電流와 토오크電流成分으로 자동적으로 분해되어 토오크를 발생시키는 전동기구의 형식이 였다. 따라서 界磁電流와 電機子電流가 각각 독립적으로 제어되는 직류전동기와 비교할때, 그 속도 및 토오크의 속응성은 따라갈 수 없는 정도이다.

1970년대초에 독일 siemens사의 F.Blaschke씨등이 중심이 되어, 유도전동기의 제어에 있어서, 磁化電流및 磁束과 토오크化電流및 回轉速度등의 제어량을 直流量으로 하는 磁界Orientation技術과 TRANSVEKTOR®制御의 도입으로, 유도전동기의 제어도 직류전동기의 제어와 흡사한 기능을 갖게금 되었다.

* 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博

이들의 기본계념은, 전동기의 회전자계의 회전을 磁界Orientation에 의하여 간접적으로 검출하고, 이를 TRANVEKTOR 理論에 의하여 회전자계자속과 평행한1차전류성분과 회전자계자속과수직인 1차전류성분으로 분리하여, 전자는 2차자속을, 후자는 토오크를 제어하는 방식이다. 이 제어방식에서는 유도전동기의 발생토오크의 순시치가 직접 제어됨으로 순시부하토오크에 대하여 지연응답을 갖었든 종래의 유도전동기와는 판이한 속응성특성을 갖는다.

회전자계자속의 검출방식에서 아직도 여러가지 문제점이 제기되고 있으나 이들의 기술적해결이 가능하다

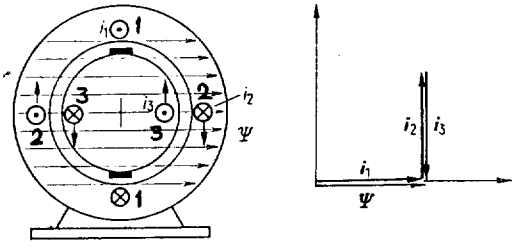
여기서는 이들의 기본계념과 실제적인 사항에 대하여 좀더 구체적으로 살펴보고자 한다.

2. 磁界Orientation의 原理

2.1 電流制御 Field orientation

磁界Orientation의 원리를 이해하기 위하여, 우선 직류기의 경우를 살펴보자

그림1은 직류기의 권선배치도이다. 여기서, 界磁巻線1에 전류i_1이 흐르면 磁界 Ψ가 형성된다. 이때 토오크의 생성을 위하여는 계자자속에 수직인 곳에 있는 電機子巻線 3에 i_3인 전류를 흘리면 된다. 이때 전동기축에는 최대토오크를 효과적으로 발생한다. 그러나 전기자권선에도 原磁界에 수직으로 원자계에 중첩해



Field and currents　　Vector diagram

1: 계자권선 2: 보상권선 3: 전기자권선

그림 1. 직류기에서의 자계와 전류분포 (a) vector diagram (b)

서 전기자반작용의 자계를 형성시킨다. 이들은 효과적인 토오크발생을 저해하는 성분으로 작용함으로 이를 소거시켜야 할 것이다. 여기서 전기자권선과 대치하는 곳의 界磁측에 補償巻線 2를 배치하여, 전기자권선전류와 그 크기가 같고, 방향이 반대인 전류를 흐르게 하여, 전기자권선류로 인한 자계를 상쇄시키게 끔 한다. 그리하여 전류i_1로서 界磁磁界를 조정하고, 전류 i_2로서 계자자계와 함께 토오크를 효과적으로 발생케한다.

한편, 유도전동기에서는, 그림 2에서와 같이, 직류기의 전기자권선이 위치한 곳에 단락된 농형권선이 존재하고, 이곳의 전류는 회전자계의 회전자속변화로 인한 유도전류라는 점이 직류기의 경우와 근본적으로 다르다.

지금, 그림 2의 고정자권선 1의 전류i_1으로 인하여 자계가 형성되고, 이런 상황에서, 직류기의 보상권선위치에 배치된 고정자권선 2에 전류i_2가 갑짜기 흐른다고 할때, 이로 인하여 이에 대응하는 회전자권선 3에는 크기가 같고, 방향이 반대인 전류i_3가 흐르게 될 것이다. 그러나, 전류i_2로 인하여 자계는 어떤 시간

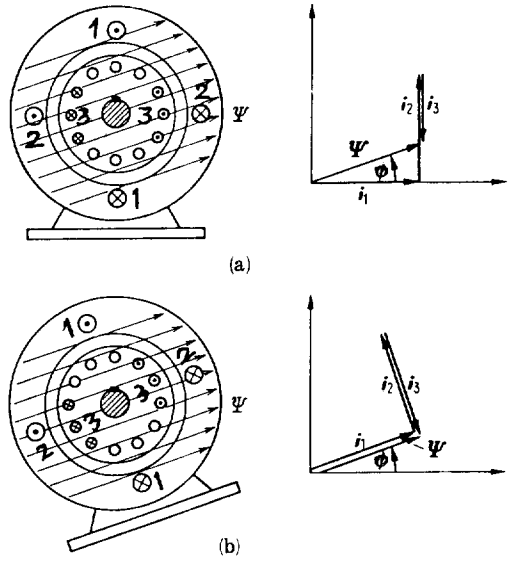


그림 2. 유도전동기에서의 전류및 자속분포도

이 경과하면서 반시계 방향으로 회전하게 될것이고, 이때 전류i_3는 회전자계자속로 의한 자속변화로 인한 유도전류에 해당할것이므로, 결과적으로 그림 2의 (a)와 같은 전류 및 자속분포를 갖게 된다고 볼 수 있다. 이때의 vector diagram은 직류기와 달리 자속Ψ와 전류i_1의 벡타사이에는 위상각 ϕ를 갖어 효과적인 최대토오크를 생성시킬 수 없게 된다.

지금, 자화권선이 배치된 고정자를 순간적으로 회전자속방향으로 위상각 ϕ만큼 회전시켰다면, 그림 2의 (b)도와 같이 되어, vector diagram도 직류기와 같

은 상태로 될것이고, 토오크도 효과적인 최대토오크를 갖게 될것이다. 이렇게 하는 방식이 원천적인 磁界 Orientation 制御方式이다.

이런 경우, 고정자를, 가상적으로 기계적으로 회전한 것이 여서 실제적으로 행할 수 없는 것이다. 그리하여 이를 그림 3과 같이 전기적으로 행한다. 즉 전류 i_1과 i_2를 갖는 고정자권선은 위상각 ϕ만 회전하였으나, 실제의 권선은 권선 α및 β인 상태로 남아 있으므로, 이들 권선에, 그림 3의 vector diagram에서

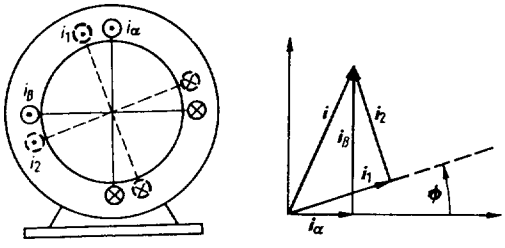


그림 3. 자계Orientation의 TRANSVEKTOR

와 같은 i_α 및 i_β인 전류를 변환시켜 흐르게끔 조정하여 주어야 할 것이 것이다. 이를 전류제어를 위한 TRANSVEKTOR制御라 한다.

즉,

$$i_\alpha = i_1 \cos\phi - i_2 \sin\phi ,$$
$$i_\beta = i_1 \sin\phi + i_2 \cos\phi \qquad (1)$$

인 관계를 갖는 전류를 고정자권선에 인가하면 될것이다. 실제로는 이러한 관계를 그림 4와 같은 演算器에 의하여 행하는데, 이를 Vector rotator라 한다.

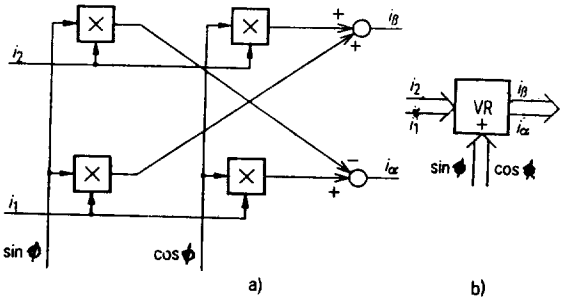


그림 4. 자계좌표계에서 고정자좌표계로 변환시키는 Vector rotator

그림 5는 유도전동기에 磁界Orientation 制御를 적용시킨 경우의 단선도이다.

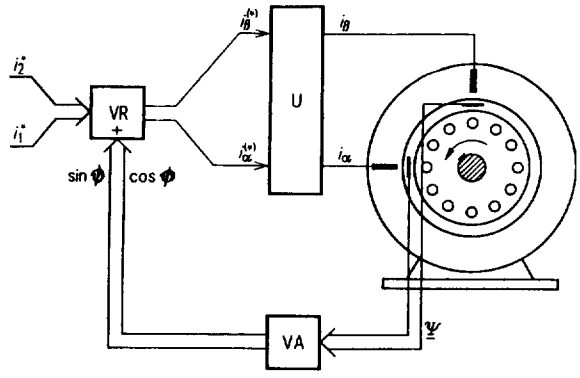


그림 5. 유도전동기에 자계Orientation을 위한 Vector rotator의 적용도

Vector rotator, VR에서는 所要位置値 $i_\alpha^{(*)}$ 및 $i_\beta^{(*)}$를 자계위상각 ϕ의 함수와 設定値 i_1^* 및 i_2^*로서 변화시켜, 가변전류변환기 U에서, 이를 해당 고정자권선에 i_α및 i_β로 변환시켜 인가한다. 자계위상각 ϕ는 전동기내의 자계Vector를 측정하여 얻는다. 자계Vector의 2개의 성분은 전동기내의 공격의 서로 다른 위치에 설치된 Hall발생기에 의하여 측정하며, 해당위상각함수 $\cos\phi$ 및 $\sin\phi$는 Vector analyzer, VA로 변환시킨다.

한편, Hall발생소자를 고정자의 공격측에 설치하는 것은 일반유도전동기에 자계Orientation운전을적용하는데 불편한 취약점이다. 그리하여, 최근에는 피제어전동기의 電動機定数로서 산정한 2차자속 산정치와 토오크산정치에 해당하는 1차전류치를 Vector량으로 하여 이를 연산하고, 이를 토대로한 1차전류의 TRANSVEKTOR제어에 의한 자계Orientation운전방식이 개발되어 실용화된 경우도있다.

2.2 電壓制御 Field orientation

Static converter, U가 가변전압변환기인 경우에는, 권선 α 및 β에는 所要位置値 $U_\alpha^{(*)}$ 및 $U_\beta^{(*)}$에 의하여 변환되어, 전압 U_α 및 U_β가 인가된다. $U_\alpha^{(*)}$및 $U_\beta^{(*)}$는 電流設定値 i_1^* 및 i_2^*에서 변환된다. 그 과정은, 먼저 전동기내에서의 저항전압강하 및 인덕티브 전압강하와 역기전력을 검출하여 구성된 벡타 $\mathbf{U}_\phi^{(*)}$로서 시작한다. 물론 $\mathbf{U}_\phi^{(*)}$은 i_1^* 및 i_2^*로 인한 전류벡타 $\mathbf{i}_\phi$에 의하여 형성된것이다. 이들은 식(2)와 같은 좌표변화에서 고정자좌표의 전압벡타 $\mathbf{U}_s^{(*)}$로 변환된다.

$$\mathbf{U}_s^{(*)} = \mathbf{D}(+\phi)\mathbf{U}_\phi^{(*)} \qquad (2)$$

여기서, $\mathbf{D}(+\phi) = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}$

$$\mathbf{U}_s^{(*)} = \begin{pmatrix} U_\alpha^{(*)} \\ U_\beta^{(*)} \end{pmatrix}, \mathbf{U}_\phi^{(*)} = \begin{pmatrix} U_1^{(*)} \\ U_2^{(*)} \end{pmatrix}$$

3. Field orientation의 실제

유도전동기를 TRANSVEKTOR制御로 할것 같으면, 정상특성 및 과도특성이 모두 직류기와 동등한 특성을 갖는다.

지금, 펄수폭변조형인버타(Pulse width modulated inverter)에 의하여 전원이 공급되는 유도전동기에 磁界Orientation運轉方式이 적용된 것을 예로 들어 이를 좀더 구체적으로 살펴보기로 한다.

그림 6은 유도전동기에 자계Orientation제어를 한 계략도이다. 자계Orientation은, 원리적으로는, 교류량으로 측정된 제어량인 자속 및 전류 (고정자Orientation량인ψ_R, ψ_S또는 i_R, i_S)를 자화전류(i_1—제어)와 유효전류(i_2—제어)로서 이를 각각으로 제어할 수 있도록한 직류량(자계Orientation량 ψ_L 또는 i_1 i_2)으로, 자계Orientation좌표변환에 의하여 변환시키는 것을 말한다. 이를 기초로 하여 구성한 제어계통에는 i_1제어로서의 磁束制御系(ψ－제어)와 i_2제어로서의 速度制御(n－제어)가 포함되어있다. 이를 기능별로 살펴보면 다음과 같다.

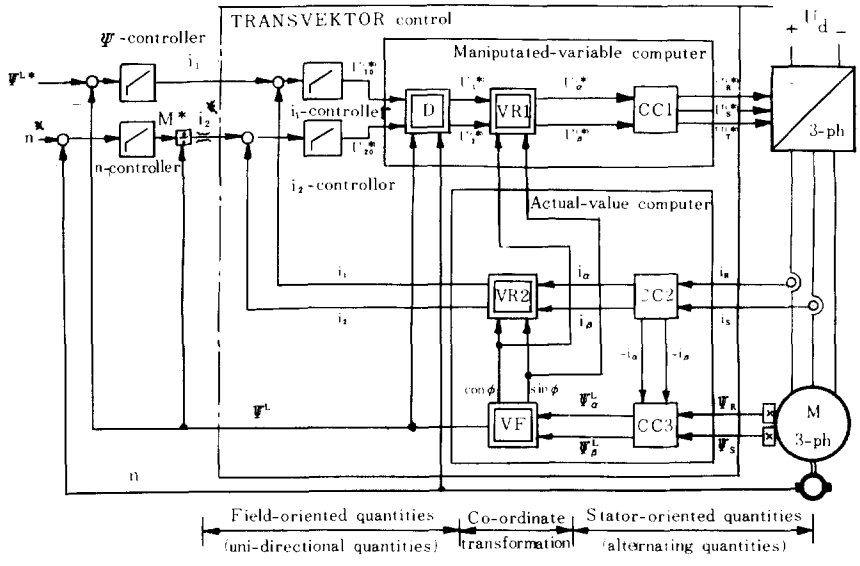


그림 6. 펄스폭변조형 인버터에 의한 유도전동기의 자계 Orientation 제어도

3.1 Actual-value computer

(1) 磁束座標變換器, CC 3

TRANSVEKTOR제어에 있어서, 자속좌표변환기CC 3는, IC OP-amp로 되어 있으며, 120°위상차의 ψ_R, ψ_S인 량을 식(3), 식(4)에서와 같이 90°위상차의 ψ_α, ψ_β인 량으로 변환시키는 基本座標變換器와, 공격자속성분ψ_α, ψ_β를 회전자자속성분ψ_α^L, ψ_β^L로 식(5), 식(6)에서와 같이 변환시키기위한 補助裝置로 되어 있다.

$$\overline{\psi}_\alpha = \overline{\psi}_R \tag{3}$$

$$\overline{\psi}_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{1}{2}\overline{\psi}_R + \overline{\psi}_S\right) \tag{4}$$

$$\psi_\alpha^L = k_L^{-1}\psi_\alpha - L_\ell i_\alpha \tag{5}$$

$$\psi_\beta^L = k_L^{-1}\psi_\beta - L_\ell i_\beta \tag{6}$$

여기서, K_L: 회전자의 결합계수

L_ℓ: 회전자의 누설인덕턴스로서, 이들을 평형용potentiometer로 조정한다.

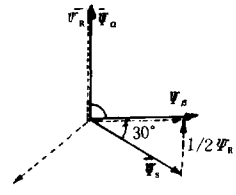


그림 7. 좌표변환기 CC 3의 원리도

(2) 電流座標變換器CC 2

전류좌표변환기CC 2는 IC OP-amp로 구성되어있으며, 이들은 그림 7과 같은 원리로 동작한다. 여기서는 120°위상차를 갖는 i_R, i_S인 량을, 90° 위상차의 i_α, i_β인 량으로 변환한다.

$$\bar{i}_\alpha = \bar{i}_R \tag{7}$$

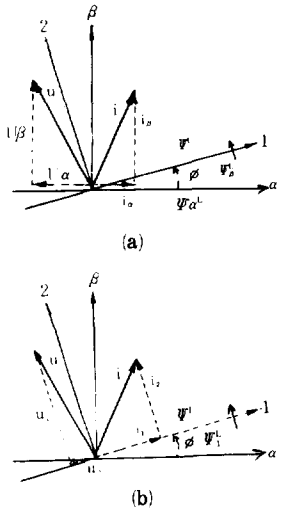
$$\bar{i}_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2}\bar{i}_R + \bar{i}_S\right) \tag{8}$$

(3) Vector filter, VF

회전자의 스롯으로 인하여 검출된 자속성분중에 고조파가 포함되어 있다. 따라서 좌표변환을 할때의 오차를 될 수 있는데로 적게 하기 위하여, 90°위상차를 갖는 자속성분에서 생기는 고조파를 훨터링시킬 필요가 있다. 이를 위하여 低域훨터(Low pass filter)가 필요하다.

(4) 磁界 Orientation 座標變換

자계Orientation좌표계는 그림 8에서 좌표축 1의 자속벡타 ψ_L의 방향과 일치하도록 정의된다. 그리고



(a) Stator-oriented components (b) Field-oriented components

그림 8. Space vector diagram

α, β : 고정자좌표계
1, 2 : 자계좌표계
U : 고정자전압벡타
i : 고정자전류벡타
ψ : 회전자자속벡타

다음과 같은 변환식이 적용된다.

$$\psi_\phi{}^L = \mathbf{D}(-\phi)\,\psi_s{}^L \tag{9}$$

여기서, $\psi_s{}^L = \begin{pmatrix}\psi_\alpha{}^L \\ \psi_\beta{}^L\end{pmatrix}$ Rotor flux vector, stator-oriented,

$$\psi_\phi{}^L = \begin{pmatrix}\psi_1{}^L \\ 0\end{pmatrix}$$ Rotor flux vector, field-oriented,

$$\mathbf{D}(-\phi) = \begin{pmatrix}\cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi\end{pmatrix}$$ Rotational matrix

고정자전류벡타 $\mathbf{i}_s$는 회전matrix에 의하여 다음과 같이 변환된다.

$$\mathbf{i}_\phi = \mathbf{D}(-\phi)\,\mathbf{i}_s \tag{10}$$

여기서, $\mathbf{i}_s = \begin{pmatrix}i_\alpha \\ i_\beta\end{pmatrix}$ Stator current vector, stator-Oriented,

$$\mathbf{i}_\phi = \begin{pmatrix}i_1 \\ i_2\end{pmatrix}$$ Stator current vector, field-oriented,

(5) Vector rotator, VR2

회전matrix $\mathbf{D}(-\phi)$는 vector rotator VR 2로서 행한다. TRANSVEKTOR制御의 이러한 기능은, 각각 2개의 four-quadrant multiplier와 1개의 adder amplifier로 되어 있다. 그림 4은 그 기본회로도이다.

3.2 制 御

자화전류 i_1 및 자속ψ_L와 토오크전류 i_2 및 회전속도 n등의 제어량은, 직류량으로 쓰인다. 그러므로 유도전동기의 제어는 직류전동기의 제어와 흡사하게 행하여 진다.

(1) 磁束制御

유도전동기중의 회전자자속은 전류성분 i_1에 의하여 결정된다. 따라서 i_1의 제어는 직류기에서의 계자전류에 해당한다. 고속운전시에는 전동기 및 인버터의 정격전류를 줄이기 위하여 계자감쇄운전을 행할수 있다. 자속변경시의 동특성을 개선하기 위하여는 i_1제어계의 외측에 ψ제어계를 겹치게 할 수 가 있다. i_1 및 ψ제어의 최적조정은 전동기의 정지상태에서도 행할 수 있다.

(2) 토오크制御 및 速度制御

전류제어 i_2가 토오크제어의 기준이 된다. 즉 i_2제어는 직류기에서의 전기자전류제어에 해당한다. 속도제어에서는 i_2 제어계의 외측에 n제어계를 갖고 있다.

제어량 i_1 및 ψ_L는 항상 같은 부호를 갖고 있으나 전동기동작에서 발전기동작으로 옮길때의 i_2의 극성과 회전방향반전시의 n의 극성은 변화하게 된다.

3.3 Manipulated-variable computer

$U_1^{(*)}$ 및 $U_2^{(*)}$로 구성된 고정자전압에 대한 조작량벡타(Manipulated-variable vector) $\mathbf{U}_\phi^{(*)}$의 자계 Orientation좌표계에서 고정자 Orientation 좌표계에의 변환은, 조작량연산기 중에서 행한다. Decoupling회로D에 의하여 i_1 및 i_2용의 2개의 전류제어계는 상호간섭을 하지않도록 되어 있다. 이 演算回路의 출력전압 $U_1^{(*)}$ 및 $U_2^{(*)}$는 Vector rotator, VR_1과 전압좌표변환기 CC 1중에서, 3상의 제어전압시스템 $U_R^{(*)}$, $U_S^{(*)}$ $U_T^{(*)}$로 변환시킨다.

(1) Decoupling

유도전동기의 구조상의 제약으로 부터 조작용벡타 $\mathbf{U}_\phi^{(*)}$의 성분 $U_1^{(*)}$ 및 $U_2^{(*)}$는, 각각 양쪽의 전류성분 i_1 및 i_2에 영향을 미친다. 전류성분을 상호간섭없이 제어하기 위하여는, 양쪽의 전류조절기의 출력전압 $U_{10}^{(*)}$ 및 $U_{20}^{(*)}$은 그림9에서와 같이 Decoupling 회로D에서 조작량성분 $U_1^{(*)}$ 및 $U_2^{(*)}$로 변환된다. k_σ, k_e 및 T_σ인 계수에는, 유도전동기의 주인덕턴스, 누설인덕턴스 및 저항분이 포함되어있는 이들의 계수를 전동기정수에 맞도록 조정하여야 한다.

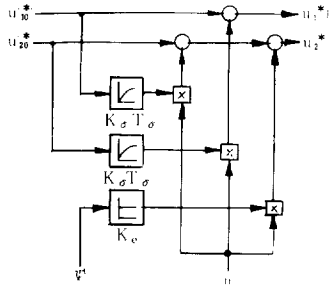


그림 9. Decoupling회로 D의 기본도

(2) 고정자Orientation좌표변환에 대한Vector rotator

고정자전압에 대한 조작량벡타 $\mathbf{U}_\phi^{(*)}$는 회전matrix을 사용하여 고정자Orientation 좌표계로 변환된다.

$$\mathbf{U}_S^{(*)} = \mathbf{D}(\phi)\mathbf{U}_\phi^{(*)} \tag{11}$$

여기서 $\mathbf{U}_S^{(*)} = \begin{pmatrix} U_1^{(*)} \\ U_2^{(*)} \end{pmatrix}$ Manipulated-variable vector, field-oriented,

$\mathbf{U}_S^{(*)} = \begin{pmatrix} U_\alpha^{(*)} \\ U_\beta^{(*)} \end{pmatrix}$ Manipulated-variable vector, stator-oriented

회전matrix $\mathbf{D}(\phi)$는 Vector rotator VR 1에 의하여 실현되며, VR1과 VR 2의 기능소자는 구조적으로 같으나, 다른 부가요소가 첨가되면 다른 기능을 갖는다.

(3) 전압좌표변환기

전류좌표변환기CC 2와 같이, IC OP-amp로 구성된 전압좌표변환기CC 1에서는, 90° 위상차량 $U_\alpha^{(*)}$, $U_\beta^{(*)}$을 120°위상차량 $U_R^{(*)}$, $U_S^{(*)}$, $U_T^{(*)}$으로 변환한다.

3.4 운전결과

이상과 같이, 펄스폭변조형인버터에 의하여 운전되는 磁界Orientation制御方式의 농형유도전동기는, 제어장치가 붙은 직류전동기가 갖는 특성을 다 갖춘 가역구동장치이다. 또한 보수가 필요없고, 브랏쉬레스형이므로, 정지상태에서도 정격토오크를 연속적으로 낼수있으며, 관성이 적으므로 제어특성면에서도 유리하다.

4. 끝 맺음

전동기제어시스템은, thyristor의 개발로 펄스폭변조형인버터와 같은 switching기능을 내포한 전원장치의 적용으로, 整流機構가 기계적접점형식에서 전기적 무접점화되어 대체되는 추세에 있어, 속도조정방식도 바꾸어져야 하게 되었다. TRANSVEKTOR制御를 적용한 磁界Orientation方式은, 이러한 관점으로 볼때, 근원적으로 교류전동기의 속도조정기능을 실용화하는데는 가장 효과적인 방식이라고 볼 수 있다. 더욱이 제지공장 및 직물공장등 폐회로 제어운전을 하는 공정의 전동력기구에서는, 현재 활발히 개발되고 있는 전자계산조직의 활용으로, 종래 직류전동기로서의 Leonard방식의 속도제어를 하는 것에 비하여, 속응성, 신뢰성 및 그 정도에 있어서 월등하게 우수한 기능을 가진 전동기제어시스템의 실용화가 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

[1] Blaschke, F; Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens-Z, 45 (1971)

[2] Langweiler, F; Richter, M; Flußerfassung in Asynchronmaschnen, Siemens-Z, 45 (1971)

[3] Floter, W; Ripperger, H; Die TRANSVEKTOR-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine, Siemens-Z, 45 (1971)